

固定污染源烟气监测中含湿量测试方法优化研究

龙世康,孙行荣,詹文森,徐曼宁,何志远,黄汉明,彭江波,尹文华*

(生态环境部华南环境科学研究所,广东 广州 510655)

摘要:根据烟气二噁英采样须收集冷凝水的特点,利用理想气体状态方程计算烟气含湿量,得到简化公式,将该简化公式法与阻容法、FTIR法用于测定4类不同行业企业烟气的含湿量,并对测定结果做比对。结果表明,4类不同行业企业简化公式法的测量结果RSD为1.0%~4.2%,相对偏差为-4.21%~-0.25%;在湿度较高的测量条件下,简化公式法的测量结果RSD与相对偏差均<5%。该方法可作为固定污染源烟气手工监测中含湿量测量的一种辅助方法和质控措施。

关键词:含湿量;简化公式法;理想气体状态方程;烟气;固定污染源

中图分类号:X831 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)04-0061-03

Research on Optimization of Moisture Content Test Method in Flue Gas from Stationary Source

LONG Shi-kang, SUN Xing-rong, ZHAN Wen-sen, XU Man-ning, HE Zhi-yuan, HUANG Han-ming, PENG Jiang-bo, YIN Wen-hua*

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou, Guangdong 510655, China)

Abstract: According to the characteristics of collecting condensate water for dioxins sampling in flue gas, the ideal gas state equation was used to calculate the moisture content of flue gas, and the simplified formula was obtained. Compared the simplified formula method with resistance capacity method and FTIR method in determining the moisture content of flue gas in four different industries, the results showed that the RSDs of the measurements by the simplified formula method ranged from 1.0% to 4.2%, and the relative deviation was -4.21% ~ -0.25%. Under the condition of high humidity, the RSDs and the relative deviation of the simplified formula method were all less than 5%. This method could be used as an auxiliary method and quality control measures for moisture content determination in manual monitoring of flue gas from pollution source.

Key words: Moisture content; Simplified formula method; Ideal gas state equation; Flue gas; Stationary source

环境监测是生态环境保护部门决策的有力支撑,其数据真实性与准确性是重要前提^[1]。在固定污染源烟气监测中,烟气含湿量作为一个重要参数指标参与标准状态下干气体积、干气流量的计算。标准方法^[2-3]规定,固定污染源烟气排放浓度、排放量及排放速率等计算都须用到标准状态下干气体积。

传统的含湿量测量方法有干湿球法、重量法及冷凝法。干湿球法虽然操作相对简单便捷,但在高温条件下测量含湿量的准确性较差,应用范围窄^[4];通过冷凝水质量或体积来计算含湿量的重

量法和冷凝法虽然准确性高,在实际的现场监测采样工作中却难以实现^[5]。近年来,含湿量测量新方法相继出现,如阻容法、傅里叶变换红外光谱法(FTIR)等。阻容法虽然测量精度高,测量仪器耐腐蚀、使用寿命长、操作界面简单,却不宜在180℃

收稿日期:2021-07-28;修订日期:2022-06-20

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金资助项目(PM-zx703-202011-323);深圳市可持续发展科技专项基金资助项目(KCXFZ20201221173402007)

作者简介:龙世康(1995—),男,广东广州人,助理工程师,本科,从事环境监测和研究。

*通信作者:尹文华 E-mail: yinwenhua@scies.org

以上工况下使用^[6-7],已被纳为团体标准^[8]推广使用。FTIR 测量精确度高,被广泛应用于企业 CEMS 在线监测。在垃圾焚烧^[9-10]、危废处置、金属冶炼等行业固定污染源烟气二噁英采样中,标准^[11-12]规定应对采集的烟气进行冷却并收集冷凝水。今在烟气二噁英现场监测过程中结合冷凝法,得到含湿量的简化计算公式,并将该简化公式法用于测定 4 类行业企业烟气的含湿量,与阻容法、FTIR 法测量结果进行比对。

1 试验

1.1 主要仪器与试剂

自动等速废气二噁英采样系统,冷却水循环机,意大利 APIS;ZR-D13E 型阻容式含湿量测试枪,中国众瑞公司;1 L 量筒,中国天玻公司。以上仪器设备都经过检定或校准。

1.2 试验装置

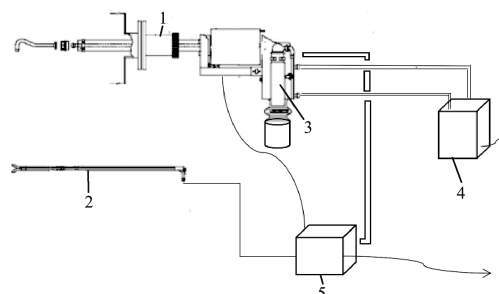
选用自动等速废气二噁英采样系统,见图 1,烟气经过可加热式采样烟枪加热至 120 ℃,再通过冷却循环水(5 ℃ 以下)冷却。冷凝水被收集至冷凝水瓶内,用量筒测量冷凝水体积,通过所得冷凝水体积和采集的烟气体积计算烟气含湿量。

1.3 简化公式

在使用自动等速二噁英废气采样系统采样过程中,被加热的烟气中水分绝大部分被冷凝收集到冷凝水瓶中,剩余极少部分外排空气,该部分损失忽略不计。简化计算公式如下:

$$X_w = \frac{1.24G_w/1\ 000}{1.24G_w/1\ 000 + V_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_w 为含湿量计算值,%; V_T 为标准状态下干



1—可加热采样烟枪;2—皮托管;3—冷凝和吸附模块;4—冷却水循环机;5—采样主机。

图 1 自动等速烟气二噁英采样系统示意

Fig.1 Schematic diagram of automatic isometric sampling system for dioxin in flue gas

采样体积, m^3 ; G_w 为冷凝水质量, g (密度约为 $1\ g/mL$, 故 G_w 与冷凝水体积相等); 1.24 为理想状态下 $1\ g$ 冷凝水转换为气体的体积, L。

1.4 试验方法

试验拟在二噁英采样过程中,通过冷凝水体积计算采样过程中烟气含湿量。冷却水循环机控制冷却循环水在 $5\ ^\circ C$ 以下,选用蛇形冷凝装置(蛇形管长度约 $1.8\ m$),使烟气得到充分冷凝。

选择南方 4 类行业企业作为研究对象,分别为金属冶炼厂、造纸厂(污泥处置生产线)、生活垃圾焚烧发电厂、危废焚烧厂,测试时企业设备运行负荷分别为 93.0% 、 92.0% 、 98.2% 、 76.4% 。用简化公式法、阻容法、FTIR 法分别对 4 类不同行业企业连续 6 次测定,每家每次测定 $1\ h$ 。为增强试验的对比性,选择在同一断面、同一时段进行测量。烟温、烟气流速、烟气负压等参数是影响含湿量测量的主要因素,试验时记录相关数据,见表 1。

表 1 4 类行业企业工况参数及烟气净化处理工艺

Table 1 Operating parameters and flue gas purification process in 4 industries

企业类型	现场烟气特征				工况负荷/%	烟气净化处理工艺
	烟温 θ / $^\circ C$	流速 v / ($m \cdot s^{-1}$)	动压 p/Pa	静压 p/Pa		
金属冶炼厂	46.2	2.46	3.9	-12.8	93.0	回转窑干燥 + 还原炉熔炼 + 急冷塔 + 旋风除尘 + 臭氧氧化 + 碱液喷淋脱酸 + 静电除雾
造纸厂 (污泥处置生产线)	59.5	10.12	79.6	83.6	92.0	SNCR 脱硝 + 布袋除尘 + 干法脱酸 + 湿式电除尘 + 烟气脱白
生活垃圾焚烧发电厂	185.1	19.01	186.6	-112.5	98.2	SNCR 炉内脱硝 + 半干法/干法脱酸 + 活性炭吸附 + 布袋除尘
危废焚烧厂	122.9	1.76	1.6	-113.7	76.4	SNCR 脱硝 + 急冷塔 + 活性炭吸附 + 干法脱酸 + 布袋除尘 + 湿法脱酸

2 结果与讨论

采用上述 3 种方法测定 4 类不同行业企业烟

气的含湿量,结果见表 2。

表2 4种不同类型行业企业烟气含湿量测定结果 %
Table 2 Flue gas moisture content measurement from 4 different industries %

企业类型	简化公式法			阻容法			FTIR法		
	X_w 均值	相对偏差	RSD	X_w 均值	相对偏差	RSD	X_w 均值	相对偏差	RSD
金属冶炼厂	12.2	-1.90	3.0	12.5	0.32	1.5	12.7	1.58	1.4
造纸厂(污泥处置生产线)	14.2	-4.21	1.7	14.8	0.30	2.4	15.4	3.91	1.1
生活垃圾焚烧发电厂	19.7	-2.46	4.2	20.4	0.80	6.5	20.6	1.66	3.2
危废焚烧厂	27.4	-0.25	1.0	27.5	0.14	1.6	27.5	0.11	0.7

2.1 金属冶炼厂

由表2可知,在金属冶炼厂中,简化公式法、阻容法、FTIR法测定含湿量,6次测定均值分别为12.2%、12.5%、12.7%,测定结果的RSD分别为3.0%、1.5%、1.4%,表明3种测量方法精密度较高。简化公式法、阻容法、FTIR法测定结果对3种方法18组测量结果均值的相对偏差范围分别为-4.57%~-0.68%、-0.21%~1.79%、0.59%~2.77%,均<5%,表明在该行业企业工况下3种测量方法测量结果相关性较好,准确度较高。

2.2 造纸厂(污泥处置生产线)

由表2可知,简化公式法、阻容法、FTIR法测量含湿量,6次测定均值分别为14.2%、14.8%、15.4%,测定结果的RSD分别为1.7%、2.4%、1.1%。简化公式法、阻容法、FTIR法测定结果对3种方法18组测量结果均值的相对偏差分别为-5.85%~-3.05%、-2.15%~2.89%、2.96%~5.20%。简化公式法测得数据相对偏差均为负偏差,相对偏差平均值为-4.21%,说明在该企业中使用简化公式法测得含湿量结果偏低,可能因为采样系统气密性或冷却水循环机冷凝效果不佳,须在后续研究中进一步论证。

2.3 生活垃圾焚烧发电厂

由表2可知,简化公式法、阻容法、FTIR法测量含湿量,6次测定均值分别为19.7%、20.4%、20.6%,均在生活垃圾焚烧厂烟气含湿量范围内,测定结果的RSD分别为4.2%、6.5%、3.2%。简化公式法、阻容法、FTIR法测定结果对3种方法18组测量结果均值的相对偏差分别为-3.94%~-1.41%、-2.91%~4.02%、-0.93%~4.95%,表明3种测量方法相关性较好。虽然简化公式法与FTIR法可比性较高,稳定性较好,但所选垃圾发电厂烟气温度较高(平均温度达185.1℃),导致阻容法稳定性较差。

2.4 危废焚烧厂

测定时该企业烟气排放温度为122.9℃,企业

生产处理中含有液态原料,故烟气含湿量较高。阻容法、FTIR法和简化公式法测得含湿量均值分别为27.5%、27.5%、27.4%,6次测定结果的RSD分别为1.6%、0.7%、1.0%。简化公式法、阻容法、FTIR法测定结果对3种方法18组测量结果均值的相对偏差均在±2%以内,说明在该行业企业工况下3种测量方法精密度较高,准确度较好。

在4类不同类型行业企业测试中,简化公式法与FTIR法稳定性较好,适用于高湿(含湿量>10%)条件下测量;FTIR设备价格较高,不具有普适性;在高温条件下,阻容法稳定性较差;当采样系统气密性或冷却水循环机冷凝效果不佳时,可能对简化公式法测量结果造成影响。

3 结语

通过比对4类行业企业烟气含湿量的测定结果,表明在自动等速废气二噁英采样系统下,当烟枪加热至120℃,冷却循环水温度保持在5℃以下时,简化公式法测量结果精密度较高、准确度较好。阻容法能准确测量烟温低于180℃的烟气含湿量,而当烟温高于180℃时,与其他2种方法相比,阻容法测定结果的精密度较差。简化公式法与FTIR法测定结果的精密度较高,且两种方法的测量结果相关性较好。在采样现场,简化公式法可辅助测量含湿量,验证其他测量方法的准确性,建议在高湿(含湿量>10%)条件下的污染源废气手工监测中推广应用。

[参考文献]

- [1] 余良,熊向隰,杨立君,等.深圳环境监测社会化改革的实践与探索[J].环境监测管理与技术,2021,33(4):1-4.
- [2] 国家环境保护局.固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法:GB/T 16157—1996[S].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [3] 国家环境保护总局.固定源废气监测技术规范:HJ/T 397—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

(下转第71页)